

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям по курсу
«Электрофизические установки для испытаний и исследований»

**Тема: «Выбор параметров элементов разрядной цепи генератора
импульсов тока»**

для студентов специальности:
«Техника и электрофизика высоких напряжений»

Утверждено
на заседании кафедры
инженерной электрофизики
Протокол №11 от 23.02.2016

Харьков НТУ «ХПИ» 2016

Методические указания к практическим занятиям по курсу «Электрофизические установки для испытаний и исследований». Тема: «Выбор параметров элементов разрядной цепи генератора импульсов тока» : для студентов специальности: «Техника и электрофизика высоких напряжений» : сост. А.А. Петков – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016. – 9 с.

Составитель: А.А. Петков

Кафедра инженерной электрофизики

1. Общая характеристика задачи выбора параметров элементов разрядной цепи генератора импульсов тока

Задача выбора параметров элементов разрядной цепи (РЦ) генераторов импульсов тока (ГИТ) на практике возникает в ряде случаев:

- при проектировании вновь сооружаемых ГИТ;
- при переводе действующих ГИТ в новый режим эксплуатации с измененной нагрузкой;
- при переводе действующих ГИТ в новый режим эксплуатации с измененной формой импульса тока.

В общем случае импульс тока, формируемый в РЦ, может быть задан:

- аналитическим выражением;
- набором контролируемых параметров;
- комбинированным способом.

Ниже описана методика выбора параметров элементов РЦ ГИТ при задании импульса тока, протекающего в нагрузке, аналитическим выражением. Рассмотрен вариант, когда при разряде ГИТ на активно-индуктивную нагрузку, в ней протекает импульс тока апериодической формы, описываемый суммой двух экспонент.

2. Вывод соотношений для определения параметров элементов разрядной цепи генератора импульсов тока

РЦ ГИТ, которые сооружаются на базе емкостных накопителей энергии, в наиболее общем случае может быть представлена в виде последовательной RLC – цепи, показанной на рис. 1.

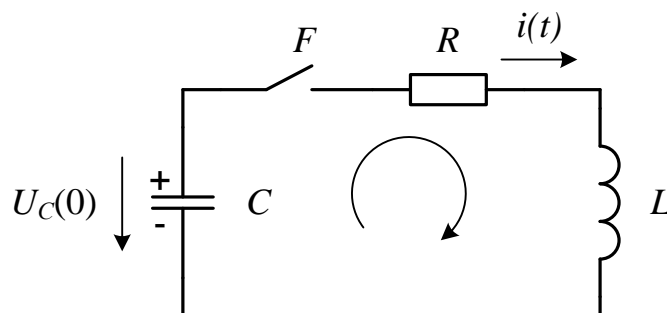


Рисунок 1 – Схема разряда конденсатора на сопротивление и индуктивность:

$U_C(0)$ – начальное напряжение на конденсаторе (напряжение зарядки);
 C – емкость конденсатора; R – сопротивление разрядного контура;
 L – индуктивность разрядного контура; F – ключ; $i(t)$ – ток разряда конденсатора

Если соотношение между величинами элементов разрядной цепи имеет вид $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, то при разряде конденсатора в цепи протекает апериодический

импульс тока вида [1]

$$i(t) = \frac{U_C(0)}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}), \quad (1)$$

где

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (2)$$

Заметим, что для величин из (2) имеют место следующие соотношения $p_1 < 0$, $p_2 < 0$ и $|p_1| < |p_2|$.

Предположим, что в схеме, приведенной на рис. 1, необходимо сформировать апериодический импульс тока вида:

$$i(t) = I_{nr} (e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t}), \quad (3)$$

где $I_{nr} > 0$ – нормирующий множитель; $\beta_2 > \beta_1 > 0$.

Сравнивая выражения (1) и (3) можно сделать вывод о том, что для формирования импульса тока вида (3) должны выполняться следующие условия:

$$I_{nr} = \frac{U_C(0)}{L(p_1 - p_2)}, \quad (4)$$

$$p_1 = -\beta_1, \quad (5)$$

$$p_2 = -\beta_2. \quad (6)$$

Эти условия позволяют вычислить элементы разрядной цепи. Так, подставляя (5) и (6) в (4) и проводя преобразования, можно определить индуктивность разрядного контура

$$L = \frac{U_C(0)}{I_{nr}} \frac{1}{\beta_2 - \beta_1}. \quad (7)$$

Далее просуммируем (5) и (6), подставим p_1 и p_2 из (2), а L из (7) и, после преобразования, получим выражение для определения сопротивления разрядного контура

$$R = \frac{U_C(0)}{I_{nr}} \frac{\beta_1 + \beta_2}{\beta_2 - \beta_1}. \quad (8)$$

Используя (5) и (6) вычислим разность $p_2 - p_1$, и, после преобразования, определим емкость конденсатора

$$C = \frac{I_{nr}}{U_C(0)} \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_1 \beta_2}. \quad (9)$$

Таким образом, используя соотношения (7) – (9), при заданных коэффициентах формы импульса тока (3) и заданном напряжении зарядки $U_C(0)$ можем определить значения параметров элементов РЦ: R , L и C .

Реально РЦ ГИТ с большой запасаемой энергией состоит из сотен и даже тысяч элементов, поэтому параметры, определенные по (7) – (9) являются эквивалентными параметрами ряда функциональных элементов, показанных на рис. 2, а именно:

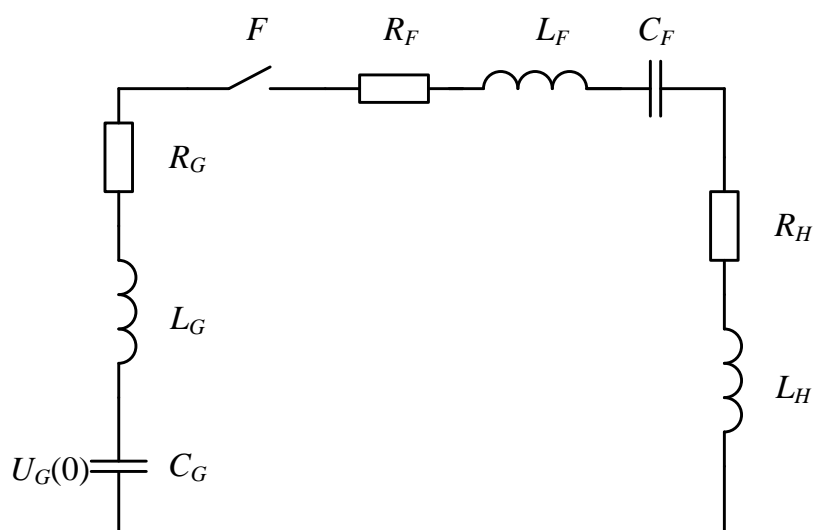


Рисунок 2 – Эквивалентная расчетная схема разрядной цепи генератора импульсов тока с формирующими элементами:

$U_G(0)$ – напряжение зарядки емкостного накопителя энергии;

R_G , L_G , C_G – соответственно активное сопротивление, индуктивность и емкость емкостного накопителя энергии;

R_F , L_F , C_F – соответственно активное сопротивление, индуктивность и емкость формирующих элементов;

R_H , L_H – соответственно формирующие активное сопротивление и индуктивность нагрузки

$$R = R_G + R_F + R_H; \quad (10)$$

$$L = L_G + L_F + L_H; \quad (11)$$

$$C = \frac{C_G C_F}{C_G + C_F}. \quad (12)$$

При переводе действующего ГИТ (известны параметры $U_G(0)$, R_G , L_G , C_G) в режим эксплуатации с новой нагрузкой (новые значения R_H , L_H) и/или новой формой импульса тока (новые значения коэффициентов выражения (3)) возникает необходимость определения значений параметров

формирующих элементов R_F , L_F , C_F , которые обеспечивают требуемую форму импульса тока.

Активное сопротивление формирующего элемента рассчитывается, исходя из соотношений (8) и (10), по формуле:

$$R_F = \frac{U_G(0)}{I_{nr}} \frac{\beta_1 + \beta_2}{\beta_2 - \beta_1} - R_G - R_H. \quad (13)$$

Для определения индуктивности формирующего элемента воспользуемся соотношениями (7) и (11), и, после преобразования, имеем:

$$L_F = \frac{U_G(0)}{I_{nr}} \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} - L_G - L_H. \quad (14)$$

Значение емкости формирующего элемента можно определить по следующей формуле, полученной из соотношений (9) и (12):

$$C_F = \frac{1}{\frac{U_G(0)}{I_{nr}} \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_2 - \beta_1} - \frac{1}{C_G}}. \quad (15)$$

Наличие формирующей емкости C_F в цепи разряда ГИТ нежелательно, так как в этом случае после окончания переходного процесса (разряда ГИТ на нагрузку) на ней и на емкости генератора C_G остается заряд, что требует принятия дополнительных мер по технике безопасности. Поэтому формирующую емкость C_F , определенную по (15), целесообразно не вводить в РЦ, а реализовать путем отключения части конденсаторов емкостного накопителя генератора (если это допускается его конструкцией) таким образом, чтобы новая величина емкости генератора C_G^* составляла [2]:

$$C_G^* = \frac{C_G}{1 + \frac{C_G}{C_F}}. \quad (16)$$

В случае если, рассчитанные по (13) – (15), параметры принимают отрицательные значения (что физически не реализуемо) или значения, которые невозможно реализовать технически, следует констатировать, что при заданном напряжении зарядки емкостного накопителя $U_G(0)$ невозможно в РЦ сформировать требуемый импульс тока. Выходом из этой ситуации является повышение напряжения зарядки емкостного накопителя.

3. Примеры выбора параметров элементов РЦ ГИТ

Пример №1. Требуется определить эквивалентные параметры РЦ ГИТ, который должен формировать при замкнутом выходе импульс тока вида $i(t) = I_{nr} (e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t})$. Значения коэффициентов: $I_{nr} = 2 \cdot 10^3$ А, $\beta_1 = 2 \cdot 10^4$ с⁻¹, $\beta_2 = 2,8 \cdot 10^5$ с⁻¹. Напряжение зарядки ГИТ не должно превышать 10 кВ.

Напряжение зарядки ГИТ примем равным 10 кВ. Используя соотношения (7) – (9) вычислим параметры элементов РЦ:

эквивалентная индуктивность

$$L = \frac{1 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{2,8 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^4} \approx 1,92 \cdot 10^{-5} \text{ (Гн)}. \quad (17)$$

эквивалентное сопротивление

$$R = \frac{1 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^3} \cdot \frac{2 \cdot 10^4 + 2,8 \cdot 10^5}{2,8 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^4} \approx 5,77 \text{ (Ом)}. \quad (18)$$

емкость накопителя

$$C = \frac{2 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^4} \cdot \frac{2,8 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^4 \cdot 2,8 \cdot 10^5} \approx 9,29 \cdot 10^{-6} \text{ (Ф)}. \quad (19)$$

Полученные расчетные значения параметров элементов могут быть технически реализованы [3].

Пример №2. Имеется ГИТ со следующими параметрами: емкость накопительной конденсаторной батареи – $C_G = 4 \cdot 10^{-4}$ Ф; активное сопротивление ветви емкостного накопителя энергии – $R_G = 0,4$ Ом; индуктивность ветви емкостного накопителя энергии – $L_G = 1 \cdot 10^{-6}$ Гн; зарядное напряжение конденсаторной батареи может изменяться в интервале – $U_G(0) = 2 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3$ В. Требуется выбрать параметры формирующих элементов таким образом, чтобы в активно-индуктивной нагрузке протекал апериодический импульс тока вида $i(t) = 2 \cdot 10^3 (e^{-2 \cdot 10^4 t} - e^{-2,8 \cdot 10^5 t})$. Параметры нагрузки: активное сопротивление ветви нагрузки – $R_H = 2$ Ом; индуктивность ветви нагрузки – $L_H = 2 \cdot 10^{-7}$ Гн.

Напряжение зарядки ГИТ примем равным 2 кВ. Используя соотношения (13) – (15) вычислим параметры формирующих элементов РЦ.

Формирующее сопротивление

$$R_F = \frac{2 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} \cdot \frac{2 \cdot 10^4 + 2,8 \cdot 10^5}{2,8 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^4} - 0,4 - 2 \approx -1,25 (\text{Ом}). \quad (20)$$

Получено отрицательное значение сопротивления, что физически не реализуемо. Следуя приведенным выше рекомендациям, увеличим напряжение зарядки емкостного накопителя и примем его равным 5 кВ.

$$R_F = \frac{5 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} \cdot \frac{2 \cdot 10^4 + 2,8 \cdot 10^5}{2,8 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^4} - 0,4 - 2 \approx 0,49 (\text{Ом}). \quad (21)$$

Формирующая индуктивность

$$L = \frac{5 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{2,8 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^4} - 1 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-7} \approx 8,42 \cdot 10^{-6} (\text{Гн}). \quad (22)$$

Формирующая емкость

$$C_F = \frac{1}{\frac{5 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} \cdot \frac{2 \cdot 10^4 \cdot 2,8 \cdot 10^5}{2,8 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^4} - \frac{1}{4 \cdot 10^{-4}}} \approx 1,95 \cdot 10^{-5} (\text{Ф}). \quad (23)$$

Чтобы не вводить формирующую емкость в РЦ отключим часть конденсаторов емкостного накопителя (предполагаем, что его конструкция допускает такую операцию). Необходимую емкость оставшейся части определим по формуле (16).

$$C_G^* = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{1 + \frac{4 \cdot 10^{-4}}{1,95 \cdot 10^{-5}}} \approx 1,86 \cdot 10^{-5} (\text{Ф}). \quad (24)$$

Полученные расчетные значения параметров формирующих элементов и емкости батареи накопительных конденсаторов могут быть технически реализованы [3].

Литература

1. Татур Т.А. Основы теории электрических цепей (справочное пособие) : учеб. пособие / Т.А. Татур. – М. : Высш. школа, 1980. – 271 с.
2. Гинзбург С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях / С.Г. Гинзбург. – М. Высш. школа, 1967. – 387 с.
3. Петков О.О. Розрахунок і проектування резистивно-індуктивних елементів високовольтних імпульсних установок : навч. посіб. / О.О.Петков. – Х. : Вид-во "Підручник НТУ "ХПІ", 2014. – 196 с. ISBN 978-617-687-010-4.